

## Международный форум «Современные мощные лазеры и их применения» (АНPLA'99)

Ю.В.Афанасьев, И.Н.Завестовская, В.Д.Зворыкин, А.А.Ионин, Ю.В.Сенатский, А.Н.Стародуб

*Приведен обзор докладов международного форума «Современные мощные лазеры и их применения», проходившего в начале ноября 1999 г. в Осаке (Япония). Форум состоял из пяти конференций: High-Power Laser (HPL) Ablation, HPL in Energy Engineering, HPL in Civil Engineering and Architecture, HPL in Manufacturing, Advanced HPL. Представлены следующие направления работ по мощным лазерам и их применениям: лазерный термоядерный синтез, применения лазеров в космосе, лазерное иницирование молний, лазерная абляция материалов короткими и ультракороткими импульсами, применение мощных лазеров в промышленном производстве, применение мощных лазеров в горном деле, демонтаж ядерных реакторов и очистка радиоактивных загрязнений при помощи лазеров, мощные твердотельные и газовые лазеры, рентгеновские лазеры и лазеры на свободных электронах. Полную информацию о форуме можно получить в Proc.SPIE (т. 3885–3889).*

С 1 по 5 ноября 1999 г. в Институте лазерной техники Университета Осаки (Institute of Laser Engineering of Osaka Univ.) (Япония) проходил международный форум «Современные мощные лазеры и их применения» («Advanced High-Power Lasers and Applications») (АНPLA'99). Сопредседателями форума являлись нобелевский лауреат проф. Ч.Таунс, (Калифорнийский университет, Беркли, США) и проф. Х.Ока (фирма «Мицубиси», Япония). Движущей силой конференции был проф. С. Накаи, бывший директор японской программы по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) в Осаке. Финансовая поддержка симпозиума осуществлялась Лазерным обществом Японии и Международным обществом оптической техники (SPIE). Форум состоял из проходивших параллельно пяти конференций:

- High-Power Laser Ablation (абляция мощным лазерным излучением);
- High-Power Lasers in Energy Engineering (мощные лазеры в технике высоких энергий);
- High-Power Lasers in Civil Engineering and Architecture (мощные лазеры в бытовой технике и архитектуре);
- High-Power Lasers in Manufacturing (мощные лазеры в промышленности);
- Advanced High-Power Lasers (прогресс мощных лазеров).

Основными направлениями работ по мощным лазерам и их применениям, обсуждавшимся на этих конференциях, являлись: лазерный термоядерный синтез, применения лазеров в космосе, горном деле, архитектуре, для демонтажа ядерных реакторов и очистки от радиоактивных загрязнений, лазерное иницирование молний, лазерная абляция материалов короткими и ультракороткими импульсами, применения мощных лазеров в промышленном производстве, лазерное разделение изото-

пов, лазерное ускорение частиц, лазерное нанесение пленок и оптических покрытий, преобразование частоты и нелинейные оптические материалы, формирование трехмерных структур, мощные твердотельные лазеры, в том числе лазеры с диодной накачкой и волоконные лазеры, мощные газовые лазеры, в том числе эксимерные, рентгеновские лазеры, лазеры на свободных электронах.

В форуме приняли участие 438 ученых из 30 стран. Общее число представленных докладов – 446, из них 176 – из Японии, 89 – из России, 44 – из США, 37 – из Китая, 25 – из Франции, 18 – из Германии, 11 – из Великобритании, а также 3 – из Белоруссии, 2 – из Украины, 1 – из Узбекистана, 1 – из Армении. Наибольшее число участников было из Японии (176). Далее следуют США (36), Россия (31), Франция (18), Германия (18), Китай (16), Великобритания (5).

### Пленарное заседание

В своем докладе на пленарном заседании «Возрастающая мощь лазеров» Ч.Таунс (Калифорнийский университет, Беркли, США) коснулся истории создания лазеров, отметив, что если первый рубиновый лазер имел пиковую мощность  $\sim 1$  кВт и КПД  $\sim 10^{-4}$  при длительности импульса генерации  $\sim 1$  мс, то средняя мощность современных лазеров превышает сотни киловатт; особо он отметил существование в России мощного Nd-лазера с энергией в импульсе 1–2 кДж и частотой следования импульсов излучения 100 Гц. Яркость современных лазеров по сравнению с яркостью некогерентных источников света такова, что излучение лазера видимого диапазона мощностью 1 Вт, направленное на Луну из района Лос-Анджелеса, хорошо визуализируется на ее поверхности, в отличие от излучения, исходящего от всего города.

Большой научный интерес представляют звездные лазеры (или радиопередающие звезды), генерирующие излучение сантиметрового диапазона с мощностью, в 10 раз превышающей мощность солнечной радиации, хотя

докладчик отметил: «Я не думаю, что мы когда-либо получим такую мощность излучения на Земле».

Проф. Ч. Яманака (Университет Осаки, Япония) свое выступление «Супермощные лазеры и их применения» посвятил разработке мощных лазеров и их применениям в Японии, уделив большое внимание 12-канальной многокаскадной лазерной установке GEKKO XII для ЛТС. С помощью этой установки, запущенной в 1983 г. в Институте лазерной техники, в 1986 г. был получен нейтронный выход  $10^{13}$  нейтронов, а в 1989 г. осуществлено сжатие мишени до плотности, в 600 раз превышающей плотность твердого тела. Размер лазерных дисков, используемых в системе, составлял  $69.4 \times 38 \times 4.5$  см. Энергия излучения равнялась 25 кДж на длине волны  $\lambda = 1.05$  мкм, 15 кДж ( $\lambda = 0.53$  мкм) и 12 кДж ( $\lambda = 0.35$  мкм), длительность импульса излучения была равна 1 нс. При длительности импульса излучения 0.1 нс ( $\lambda = 1.05$  мкм) пиковая мощность составляла 55 ТВт. В 1996 г. было завершено создание новой импульсной ультрамощной лазерной линейки, генерирующей импульс излучения с энергией 100 Дж, длительностью 1 пс и пиковой мощностью 100 ТВт. Эта лазерная линейка предназначена для исследования возможностей новой схемы поджига ЛТС (так называемый быстрый поджиг).

Экспериментальные и теоретические исследования на GEKKO XII направлены на исследование гидродинамики плотной плазмы для ЛТС и разработку ее многомерной численной модели, которая может быть использована и для решения некоторых задач астрофизики, таких как образование и эволюция звезд (так называемая лабораторная астрофизика). В Институте лазерной техники Университета Осаки разработан проект, направленный на создание ЛТС-реакторной системы Коуо. В то время как работы на CO<sub>2</sub>-лазерной системе LEKKO VIII (10 кДж, 1 нс, 10 ТВт) приостановлены, CO<sub>2</sub>-лазер с энергией излучения до 2 кДж успешно используется для лазерного инициирования молний.

Проф. А.Кантровиц (Дартмутский колледж, США), предложивший 30 лет назад концепцию ракеты с лазерным двигателем, большую часть своего выступления, озаглавленного «Тогда и сейчас», посвятил философским проблемам, отметив, что гласность (openness) является источником силы, и что надежды, которые он имел когда-то, не оправдались, а страхи остались. К последним он относит распространение раковых заболеваний, проблему производства продуктов питания и глобальное потепление. Затронув проблему мощных лазеров и их применений, он отметил, что его идея запусков ракет с лазерным двигателем жива и успешно развивается.

Проф. У.Крупке (Ливерморская Национальная лаборатория им. Лоуренса (ЛНЛЛ), США) выступил с докладом «Современные твердотельные лазеры с диодной накачкой: ближайшие тенденции и перспективы». Отметив, что хотя первое сообщение о диодной накачке появилось в 1964 г., а в 1968 г. был создан Nd-лазер с диодной накачкой, высокие плотности тока накачки лазерных диодов ( $j > 1$  кА/см<sup>2</sup>) и необходимость их охлаждения до криогенных температур мешали широкому применению диодов для накачки твердотельных лазеров. Современные лазерные диоды действуют при комнатной температуре и  $j < 0.2$  кА/см<sup>2</sup>, причем уже созданы диодные линейки с мощностью излучения от 1 до 4 кВт.

В Японии разработан слэб-лазер на Nd:YAG с диодной накачкой, мощность генерации которого составляет

3.3 кВт. В ЛНЛЛ разработан проект импульсно-периодического лазера Mercury (100 Дж, 10 Гц, КПД 10 %, 2 нс), являющегося прототипом лазера-драйвера с диодной накачкой и первым из серии проектов лазеров-драйверов Mercury → Venus → Termini → Helios (с выходной энергией до  $10^7$  Дж). Разработаны Yb:YAG-лазер с мощностью генерации 953 Вт (фирма Хьюз-Эйркрафт, США) и оптоволоконный лазер мощностью 100 Вт с диодной накачкой. Основным препятствием для широкого применения лазерных диодов являются не условия их работы, а высокая стоимость – 100 долл. США/Вт. Прогнозируется, однако, что в 2000 г. она упадет до 10 долл. США/Вт, а в 2005 г. составит 1.0 долл. США/Вт.

## Лазерный термоядерный синтез

Более 30 докладов на форуме были представлены научными центрами США, Японии, Европы, России, Китая, ведущими исследования по программе ЛТС. Сообщения У.Хогана и Г.Пауэлла из ЛНЛЛ подтверждают план создания в этом научном центре через несколько лет лазерной установки на неодимовом стекле под названием National Ignition Facility (NIF) с энергией  $\sim 1$  МДж для экспериментальной демонстрации инициированной лазером термоядерной вспышки в мишени с полезным выходом энергии.

Наряду с программой создания установок мегаджоульной энергии, таких как NIF или LMJ (Франция), в США и Японии достаточно интенсивно ведутся исследования и разработки по импульсно-периодическим лазерам-драйверам для поджига мишеней в реакторах будущих термоядерных электростанций. С.Пэйн из ЛНЛЛ сообщил об испытаниях компонентов макета такой лазерной системы (Mercury) с длиной волны излучения порядка 1 мкм на кристаллах, активированных ионами Yb<sup>3+</sup>. Накачка кристаллов производится полупроводниковыми лазерными батареями в спектральную полосу в районе 900 нм, охлаждение активной среды – прокачкой инертного газа.

В Институте лазерной техники Университета Осаки разработан действующий макет усилительного модуля импульсно-периодического лазера-драйвера на неодимовом стекле с водяным охлаждением (доклад Т.Канабе, С.Накаи, М.Накацука и др.). Модуль рассчитан на выходную энергию 10 Дж при частоте следования импульсов 10 Гц. Активный элемент в виде слэба размером  $20 \times 523 \times 119$  мм из стекла НАР-4 (производство корпорации Хойя) накачивается двумя батареями размером  $400 \times 10$  мм AlGaAs-диодов с плотностью мощности  $2.5$  кВт/см<sup>2</sup> (длина волны накачки 803 нм, производство фирмы «Хамамачу Фотоникс»). Лазерный пучок распространяется в слэбе зигзагообразно, испытывая свыше 10 полных внутренних отражений. При частоте следования импульсов 0.5 Гц экспериментально зарегистрированы следующие параметры усилителя: выходная энергия 8.5 Дж, длительность импульса 20 нс, длина волны 1053 нм, выходной пучок с размерами  $20 \times 10$  мм, угловая расходимость, всего в два раза превышающая дифракционную, КПД 10 %. Отмечается, что на основе подобных активных элементов с водяным охлаждением могут быть созданы усилительные модули с выходной энергией 1 и 10 кДж.

Японскими учеными разработан концептуальный проект термоядерной электростанции Коуо, в состав которой входят четыре реактора мощностью 600 МВт каж-

дый. В проекте используется 32-лучевая лазерная система на длине волны 351 нм с диодной накачкой. Энергия этого лазера-драйвера составляет 4 МДж, частота следования импульсов – 12 Гц и КПД – 10 %.

Возможность использования в программе ЛТС мощных лазеров со взрывной накачкой была рассмотрена в докладе Г.А.Кириллова, В.А.Ерошенко и др. (ВНИИЭФ, Россия). В экспериментах с помощью иодных лазеров со взрывной накачкой достигнута энергия 5 кДж для импульсов длительностью 5 нс, а также продемонстрирована фокусировка излучения (импульс длительностью 1нс с энергией 100 Дж) на площадку диаметром 2 мкм.

Около 10 докладов были посвящены исследованиям взаимодействия мощных лазерных УКИ с мишенями. Эти исследования проводятся в обоснование известной концепции быстрого поджига (fast ignition) термоядерной мишени. Наиболее значительные экспериментальные работы выполнены на лазерных каналах с мощностью  $10^{14} - 10^{15}$  Вт установок Nova (ЛНЛЛ), GEKKO-XII (Университет Осаки), а также в Резерфордской лаборатории (Англия).

В докладе М.Ки (США) представлены результаты экспериментов на петаваттном канале установки Nova. В серии облучения плоских полиэтиленовых мишеней зарегистрировано 40–50 %-ное преобразование лазерной энергии в энергию релятивистских электронов порядка десятков мегаэлектронвольт. При облучении пластинки из  $CD_2$  импульсом длительностью 5 пс с энергией 180 Дж зарегистрирован выход  $6 \cdot 10^4$  нейтронов с энергиями 2.45 МэВ в результате термоядерных DD-реакций, вызванных прогревом объема пластинки быстрыми электронами. Кроме того, обнаружено, что около 7 % энергии лазерного импульса преобразуется в энергию коллимированного пучка протонов порядка 55 МэВ, распространяющегося по нормали к задней поверхности мишени. При прохождении протонного пучка через пластинки из Ве и Тi наблюдались ядерные реакции  $Ve^9(p)V^{10}$ ,  $Ve^9(p,n)V^9$ ,  $Ti^{48}(p,n)V^{48}$  и другие. Авторы доклада предложили использовать полученные с помощью мощного лазера протонные пучки в схеме быстрого поджига предварительно сжатого ядра термоядерной мишени.

В экспериментах на лазерном канале Университета Осаки с выходной мощностью 100 ТВт (доклад К.Мима и др.) при облучении плоских мишеней мощными УКИ зарегистрировано 20 %-ное преобразование лазерной энергии в энергию быстрых электронов. В докладе, представленном большим коллективом исследователей из Резерфордской лаборатории, сообщается об исследовании углового распределения квантов, возникающих при торможении мегавольтных электронов в мишени. Угловое распределение квантов после вспышки определяется на основе анализа распределения изотопов, возникающих вследствие фотоядерных реакций в контрольной пластинке из меди, устанавливаемой за мишенью. Аналогичная диагностика углового распределения и спектра  $\gamma$ -квантов по изотопам золота (от  $^{197}Au$  до  $^{191}Au$ ) применяется и на петаваттном канале в ЛНЛЛ.

Наибольшее число докладов (около 20) по термоядерным исследованиям было представлено организаторами конференции – японскими учеными. Здесь следует отметить работы из Института лазерной техники Университета Осаки по изучению комбинированного нагрева и сжатия термоядерных мишеней (смешанная схема прямого и непрямого, через рентгеновское излучение, воз-

действия лазера на мишень), работы по технологии мишеней, по новым средам для лазера-драйвера (активированное неодимом кварцевое стекло), по системе фокусировки лазерного излучения на мишень и др.

Обсуждавшаяся в литературе возможность моделирования астрофизических явлений с помощью мощных лазеров нашла, по-видимому, одно из первых подтверждений в работе группы японских исследователей (Х. Такабе, К. Мима, М. Накацука и др.) из Института лазерной техники. С помощью трех каналов установки GEKKO XII было произведено облучение плотной сферической мишени, покрытой оболочкой малоплотной пены (длина волны лазера 0.53 мкм, интенсивность  $2 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>). Полученные с помощью скоростной рентгеновской камеры фотографии демонстрируют распространение ударной волны и потоков плотной плазмы в пенном слое, а также их столкновения. Эти фотографии микровзрыва мишени с характерным размером 0.1 мм действительно напоминают показанные на конференции фотографии последствий взрыва сверхновой звезды SN 1987A, запечатлевшие столкновение (в астрономических масштабах,  $\sim 10^8$  км) продуктов взрыва с материей окружавшего звезду облака газа.

## Применения лазеров в космосе

Одним из таких применений является использование мощных лазеров для удаления космического мусора с околоземных орбит за счет создания импульса отдачи на космическом объекте с последующим изменением его орбиты и сгоранием в плотных слоях атмосферы. Известен, например, проект «Орион» (США), направленный на разработку мощной лазерной системы, систем сканирования и наведения на цель. Планировалось несколько докладов из США, посвященных этой проблеме, однако они не состоялись.

Другим применением является реализация идеи А. Кантровица, опубликованной в 1972 г., об использовании импульса отдачи, возникающего при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом, для создания «лазерной тяги». В докладе В.Бона (Германская организация аэрокосмических исследований, ФРГ) дан краткий обзор исследований по этой проблеме. В частности, были отмечены работы Л.Мирабо (Исследовательская лаборатория ВВС США): проект по применению лазера мощностью 100 МВт для вывода объекта на околоземную орбиту (1988 г.) и реальные эксперименты, выполненные в 1997–98 гг. на полигоне Уайт-Сэндс (Нью-Мехико, США). В этих экспериментах специально сконструированный летательный аппарат массой 25 г с зеркальным фокусирующим отражателем был поднят на высоту  $\sim 30$  м с помощью импульсно-периодического электроионизационного  $CO_2$ -лазера с энергией в импульсе  $\sim 300$  Дж и частотой следования импульсов  $\sim 30$  Гц. В США рассматривается возможность запуска объекта с массой 1 кг на орбиту диаметром 100 км.

В Германской организации аэрокосмических исследований использовался импульсно-периодический электроионизационный  $CO_2$ -лазер мощностью 5 кВт. Объекты массой  $\sim 20 - 55$  г были подняты излучением (40 импульсов, следующих с частотой 45 Гц) на высоту 6 м (до потолка лаборатории). Следует отметить, однако, что стабилизация объекта осуществлялась направляющей движением проволокой, в отличие от экспериментов Л.

Мирабо, где для этого использовалось вращение объекта. Оценки показывают, что для вывода объекта массой порядка 10 кг на 150-километровую околоземную орбиту необходим импульсно-периодический лазер со средней мощностью 400 кВт.

В докладе И.Цуюкавы (Университет префектуры Осаки, Япония) обсуждалась японская программа использования лазеров в космосе. Одним из таких применений является концепция изменения орбиты космического объекта (с низкорасположенной на геостационарную) при помощи мощного лазера авиационного базирования. В проекте предусматривается размещение на самолете Ан-225 импульсно-периодического лазера с энергией в импульсе 1 кДж, длительностью импульса 0.1 нс, КПД 10%, частотой следования импульсов 200 Гц. Предполагаемый вес лазера составляет 4 т, источника питания – 50 т и системы охлаждения – 10 т.

Создание такого лазера планируется на 2015 год, тогда как к 2005 и 2010 гг. предполагается разработать лазеры аналогичного типа со средней мощностью 10 и 20 кВт. Утверждается, что стоимость транспортировки объекта снизится в 25 раз. Другим, пожалуй еще более фантастичным, проектом является LE-NET (Lunar Energy NETwork system), в котором предусматривается передача энергии из космоса и «лунного энергетического парка» на Землю при помощи мощных лазеров. В рамках этой концепции предполагается создать в 2000–2010 гг. Nd:YAG-лазер со средней мощностью излучения 50 кВт, а к 2050 г. разместить в космосе 200 лазеров со средней мощностью по 100 МВт.

## Лазерное инициирование молний

Создание эффективной системы молниезащиты является одной из актуальных задач современного индустриального общества. Такая система призвана предотвратить удары молнии в линии электропередач и уменьшить ущерб, вызванный внезапными скачками напряжения в сети и выходом из строя электрооборудования. Возможность использования лазеров для управления молнией, представляющая большой научный и практический интерес, находится в центре внимания исследователей и разработчиков ряда университетских лабораторий и электротехнических фирм Японии, а также США, Канады, России и других стран.

Техническое решение этой проблемы предусматривает искусственное инициирование молнии до момента ее самостоятельного развития и каналирование электрического разряда в нужном направлении. Научные исследования в основном концентрируются на лабораторных исследованиях различных факторов, влияющих на развитие искровых электрических разрядов в воздухе, и создании на их основе адекватной теоретической модели.

Наиболее широко в подобных экспериментах применяются CO<sub>2</sub>-лазеры с импульсами субмикросекундной длительности и энергией до нескольких килоджоулей и эксимерные лазеры (XeCl- или KrF-) со сравнительно небольшой энергией от нескольких десятков миллиджоулей до нескольких джоулей, длительностями импульсов от сотен фемтосекунд до десятков наносекунд и частотой повторения до кГц. С помощью ИК излучения высокоэнергетичных CO<sub>2</sub>-лазеров, обладающих наиболее низким порогом оптического пробоя воздуха, создаются плазменные шнуры длиной до нескольких метров.

Как правило, искра ИК лазерного пробоя имеет дискретную структуру, состоящую из отдельных очагов сильно ионизированной плазмы, вследствие чего требуется некоторое время, чтобы из них образовался сплошной проводящий канал, способный замыкать электрический ток. УФ эксимерные лазеры используются главным образом для создания очень узких и протяженных каналов слабоионизированной плазмы за счет эффективной многофотонной ионизации кислорода, а также увеличения эмиссии электронов с высоковольтных электродов и управления отлипанием электронов от электроотрицательных ионов O<sup>-</sup> и O<sub>2</sub><sup>-</sup>, образующихся в слабоионизованном воздухе.

В комбинированных схемах, наиболее перспективных, по общему мнению, для будущих систем молниезащиты, CO<sub>2</sub>-лазеру отводится роль спускового механизма молнии, а эксимерному лазеру – роль устройства, направляющего разряд. Наибольшая протяженность слабоионизованного канала (~200 м) получена в экспериментах Б.Лафонтена и др. (Национальный научно-исследовательский институт энергии и вещества, Канада) за счет нелинейного распространения и филаментации лазерных УКИ фемтосекундной длительности. Для УФ лазерного излучения в канале диаметром около 100 мкм характерная концентрация электронов достигала ~10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>, в то время как для ИК излучения она была на порядок ниже. С помощью таких слабоионизованных каналов удавалось направлять разряды длиной около 2 м, однако снижения напряжения пробоя промежутка при этом не наблюдалось.

Фокусировка УКИ в межэлектродном промежутке с напряжением 1.5 МВ, сопровождавшаяся образованием сильно ионизированной плазмы, давала возможность инициировать разряд длиной до 5 м при снижении напряжения пробоя почти в два раза. Одним из существенных ограничений применения этой техники в натуральных экспериментах являются сложность и высокая стоимость эксимерной лазерной системы для получения УКИ. Например, в работе Дж.Ч.Дилса и др. (Университет штата Нью-Мехико, США) многокаскадная установка, генерировавшая УФ импульсы длительностью 500 фс с энергией 60 мДж и частотой 10 Гц, состояла из задающего генератора, стретчера для удлинения импульса, регенеративного усилителя и трехпроходного усилителя на титане в сапфире, компрессора для сжатия импульса, умножителя частоты излучения и нескольких КгF-усилителей.

Инициирование разрядов при совместном действии лазерного излучения различных длин волн изучалось в работах японских (М.Учиуми и др., Университет г. Куиши, Электрическая компания Куиши) и российских ученых (Ю. Резунков и др., Институт комплексного исследования оптико-электронных приборов). В первой из них анализировались оптимальные способы фокусировки пучков CO<sub>2</sub>- (460 Дж, 50 нс) и XeCl- (2 Дж, 40 нс) лазеров для снижения напряжения пробоя, во второй – варьировалась задержка между основным импульсом CO<sub>2</sub>-лазера и вспомогательным импульсом Nd-лазера.

Наибольший интерес на конференции вызвал доклад С.Учиды и др. (Институт лазерной техники Университета Осаки, Электрическая компания Кансай, Япония), посвященный началу полевых испытаний на первой в мире станции молниезащиты, оборудованной на побережье Японского моря в местечке Дакеяма, префектура Фукуи. Это место выбрано для испытаний в связи с час-

тыми и очень сильными зимними грозами, обусловленными столкновением теплых и холодных атмосферных фронтов. Испытательная станция оборудована на вершине горы и включает в себя систему мониторинга, предупреждающую о приближении грозового фронта, 50-метровую башню, на вершине которой с помощью CO<sub>2</sub>-лазера (энергия в импульсе 2 кДж, импульсная мощность 20 ГВт, 2 пучка) и фокусирующей оптики (до 1 м в диаметре) создавался плазменный шнур, направленный в сторону грозовой тучи.

Подготовка лазера к работе завершалась по сигналу с медленного электростатического датчика, реагировавшего на нарастание напряженности электрического поля. Другой датчик, быстрый, регистрировавший предвестники основного разряда молнии в грозовой туче, запускал лазер с микросекундной погрешностью. С помощью видеокамер и электромагнитного волнового интерферометра удалось зафиксировать по крайней мере два успешных события замыкания молнии на «плазменный громоотвод». В планы дальнейшего развития станции входит разработка гибридной системы на основе CO<sub>2</sub>- и эксимерных лазеров.

### Лазерная абляция материалов короткими импульсами и УКИ

В настоящее время это – новая область лазерной техники. Качество лазерно-абляционной обработки поверхностей разных материалов (металлов, полупроводников, полимеров), т. е. создание микроструктур на этих поверхностях фемтосекундными импульсами, оказывается значительно выше, чем при обработке более длинными импульсами. Представленные на конференции работы по лазерной абляции короткими (наносекундный диапазон) и ультракороткими (пико- и фемтосекундный диапазон) импульсами охватывали следующий круг вопросов:

- экспериментальное и численное исследование механизмов абляции металлов и других материалов (графит, сапфир) импульсами Nd-лазера и эксимерных лазеров;
- экспериментальная и численная оптимизация параметров кратера, возникающего при абляции металлов серией лазерных импульсов;
- формирование тонких пленок со специфическими свойствами (в том числе алмазоподобных пленок) путем образования одного или двух взаимодействующих абляционных факелов, распространяющихся к подложке, на которой формировалась пленка;
- экспериментальное исследование абляции биологической ткани эксимерными лазерами применительно к медицинским приложениям;
- сравнение эффективности абляции ультракороткими (пико- и фемтосекунды) и короткими (наносекунды) импульсами;
- экспериментальное исследование возможности использования комбинированных методов, например воздействия на мишень лазерных импульсов при одновременном обдуве поверхности мишени каким-либо газом или смесью газов;
- лазерное удаление окисных пленок с металлической поверхности;
- детектирование нанокластеров, образующихся при лазерной абляции;
- теоретическое и численное моделирование динамики возбуждения и релаксации электронов и фононов

при воздействии субнаносекундных лазерных импульсов на поверхность твердого тела;

- лазерная абляция полимеров УКИ.

Отметим ряд наиболее интересных и типичных работ в которых рассмотрены перечисленные вопросы. Наибольшее число работ по лазерной абляции было представлено французскими учеными (Национальный научно-исследовательский центр – Университет г. Марсель). Так, например, в работе М.Отрик экспериментально и численно исследовалось формирование тонких пленок. Экспериментальный метод состоял в образовании импульсами K<sub>t</sub>F-лазера двух абляционных взаимодействующих факелов, распространяющихся к подложке. Использование двух факелов существенно улучшает качество пленки, возникающей на подложке. Основное преимущество данного метода – однородность пленки, основной недостаток – перенос на подложку макрочастиц.

В работе японских авторов из Национального института материалов и химических исследований экспериментально исследовалась абляция графита импульсами YAG-лазера с длительностью 8 нс. Изучалось распределение продуктов абляции (нейтральные атомы и ионы углерода) в зависимости от плотности энергии в диапазоне 0.4–4.5 Дж/см<sup>2</sup>. Эта работа связана с проблемой формирования алмазоподобных пленок.

В совместной работе сотрудников Института нелинейной оптики и высокоскоростной спектроскопии им. М. Борна (ФРГ) и Технического университета (Шалменс, Швеция) экспериментально исследовалась УКИ-лазерная абляция сапфира. Цель работы – различить два механизма абляции: нетепловой (кулоновский взрыв) при низких плотностях энергии и тепловой (фазовый переход) при плотностях энергии, превышающих порог абляции.

Экспериментальному исследованию лазерной абляции ткани миокарда импульсами YAG-лазера и эксимерных лазеров посвящена работа японских авторов (Университет Кейо, Исследовательский институт медицинской колледжа Министерства национальной обороны). Исследовались эффективность абляции и гистологические характеристики ткани после абляции в зависимости от длины волны. Обнаружено, что эффективность абляции резко возрастает для длин волн менее 300 нм. Тепловое влияние оказывалось минимальным при  $\lambda = 230$  нм. В совместной работе сотрудников Оклендского университета (США) и Института механики (Китай) экспериментально исследовалась лазерная абляция стали импульсами YAG-лазера с высокой плотностью энергии и высокой частотой повторения. При этом поверхность мишени обдувалась смесью газов (азот и кислород). Исследовались параметры кратера в зависимости от плотности лазерной энергии и скорости обдува.

Практически во всех теоретических работах (Франция, ФРГ) использовалась двухтемпературная модель металла или нестационарное кинетическое уравнение Больцмана для электронного и фононного газов с учетом поглощения лазерных фотонов. Здесь прежде всего следует отметить работы французских ученых, в которых исследовалась применимость двухтемпературной модели к изучению абляции металла фемтосекундными импульсами. Численному моделированию абляции фемтосекундными импульсами в рамках нестационарного кинетического уравнения Больцмана была посвящена работа сотрудников Института теоретической физики (Браун-

швейг, ФРГ). Развитый в ней подход позволяет исследовать столкновительные эффекты в условиях сильного отклонения состояния металла от равновесного вследствие воздействия импульсного лазерного излучения.

### Применения мощных лазеров в промышленном производстве

В рамках данной проблемы рассматривались следующие вопросы:

- основы лазерной обработки материалов;
- технологии лазерного удаления материала (сверление, резка и т.п.);
- технология лазерной модификации поверхностей материалов;
- технологии лазерной сварки;
- контрольная и измерительная аппаратура;
- промышленные применения;
- новые лазеры для лазерной обработки материалов.

Большинство докладов было посвящено режимам глубокого проплавления металлов и сплавов для целей резки и сварки, что отражает реальное повышение интереса к этим процессам в мире.

Следует отметить приоритет российских ученых в разработке физических основ, а также технологических методов глубокого проплавления в металлах и сплавах (см., например, работы Бункина, Григорьянца, Каюкова и др.).

Особый интерес представляет цикл работ японских авторов (А.Мацунава и др., НИИ резки и сварки, Университет Осаки, Х.Хоризава и др., Университет г. Токай) по динамике развития парогазового канала, развитию плазменного факела, по глубокому проплавлению для целей резки и сварки. Для исследования динамики развития парогазового канала в сталях и алюминиевых сплавах под действием непрерывных CO<sub>2</sub>-лазеров мощностью 5 и 10 кВт и импульсного YAG-лазера (энергия в импульсе 180 Дж, длительность импульса 30 мс) использовалась видеосъемка.

Было показано, что при мощности непрерывного излучения CO<sub>2</sub>-лазера более 5 кВт возникают метастабильности в развитии парогазового канала, что приводит к появлению пузырьков и пор в сварном шве на дне канала после остывания. Метастабильность вызвана интенсивным испарением металла на стенках парогазового канала. Наилучший способ избежать нестабильности – использовать профилированный импульс. (Идея использования профилированного импульса в лазерной сварке принадлежит российским ученым (Каюков и др.)) Кроме того, было показано, что образование плазмы происходит синхронно с формированием кратера, а также рассмотрено влияние защитного газа на формирование парогазового канала.

Аналізу этих же процессов были посвящены доклады К.Г.Уоткинса (Ливерпульский университет, Англия), А. Кара (Университет центральной Флориды, США) и Р. Фаббро (Франко-германская лазерная кооперация, Франция). В последнем докладе представлены также результаты взаимодействия лазерного излучения Nd: YAG-лазера с факелом. При частоте повторения импульсов ~15 кГц режим давления на парогазовый канал был циклическим, при меньшей частоте повторения (~2 кГц) парогазовый канал развивался практически стационарно.

Вторым из наиболее активных направлений современных исследований в области лазерной обработки

материалов явилось использование в технологических процессах лазеров с короткими и ультракороткими импульсами: механическое упрочнение, лазерная очистка, прецизионное сверление, прецизионная механическая обработка, образование периодических поверхностных структур, фотополимеризация и т.п. Следует особо отметить представленные на конференции результаты по прецизионному сверлению и прецизионной механической обработке. Ф. Даусингер (Штуттгартский университет, ФРГ) сообщил, что 25 % финансирования, ежегодно выделяемого в Германии на лазерные исследования, идет на создание лазерных технологий прецизионной обработки (остальные статьи расходов распределены следующим образом: 15 % – инновационные исследования, 35 % – фундаментальные исследования, 15 % – лазерная медицина, 10 % – административные расходы).

Известно, что предельные диаметры при механическом сверлении превышают 0.5 мм для керамики и 0.1 мм для стали. Максимальная глубина прецизионного лазерного сверления коррелирует с интенсивностью излучения. Наилучшие из доложенных результатов были получены с использованием пикосекундного лазера с длительностью импульса менее 20 пс, частотой повторения импульсов ~10 кГц, энергией в импульсе более 1 мДж. Диаметры отверстий составили ~30 мкм с аспектным отношением ~10.

В докладе ученых из Национального исследовательского совета (Канада) сообщалось об исследовании механизма прецизионной обработки керамики, композиционных материалов и т.п. с использованием Nd:YAG-лазера с диодной накачкой. Исследовалось также влияние поляризации лазерного излучения. Сотрудники компании «Панасоник Текнолоджис» (США) доложили о результатах использования Ti:сапфирового лазера с длительностью импульса порядка 100–200 фс для обработки металлов. Были получены каналы глубиной 4–12 нм в серебре. Для обработки полимеров использовался эксимерный лазер с  $\lambda = 248$  нм и длиной импульса 20 пс. При так называемой холодной (сухой) абляции материала получены отверстия диаметром менее 0.5 мкм. В компании «Оксфорд Лазерс» (Англия) также использовались твердотельные лазеры с диодной накачкой и лазеры на парах меди. Были получены отверстия диаметром от 50 до 100 мкм в пластинках толщиной 1 мм. Наилучшее качество отверстий с обеих сторон наблюдалось при толщине пластин не более 100 мкм и диаметре отверстий порядка 60 мкм.

Из наиболее ярких примеров использования лазеров в производстве, представленных на конференции, следует отметить применение сорокапятикиловаттного CO<sub>2</sub>-лазера на заводе Ниппон Стил Корпорейшн (Япония) для сварки прокатных листов, резку сталей со скоростью 200 мм/мин излучением Nd:YAG-лазера мощностью 3.8 кВт, использование CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 20 кВт для сварки листов нержавеющей стали толщиной 20 мм за один проход (Франко-германская лазерная кооперация, Франция, и Фраунговеровский институт лазерной техники, ФРГ).

### Применение лазеров в горном деле

Проблемой взаимодействия лазерного излучения с горными породами интенсивно занимались с конца 60-х г.г. в США, СССР и др. странах. Большая часть исследо-

ваний была проведена с лазерами мощностью 0.5–1 кВт. Однако к середине 80-х гг. интерес к этой проблеме пропал, скорее всего из-за отсутствия доступа исследователей к лазерам большой мощности (~10 кВт и выше), а также отсутствия передвижных лазерных систем и финансирования (в СССР).

Результаты работ американских ученых (Р.Грейвз, Д.О'Брайен из Колорадского горного университета, США) на полигоне Уайт Сендз (США) по исследованию взаимодействия излучения HF(DF)-лазера MIRACL с горными породами при мощности 0.5–1.2 МВт, показали, что скорость проходки скважин при лазерном бурении может быть увеличена на порядок по сравнению с традиционными методами, что вызвало новый интерес к проблеме использования лазеров в горном деле.

Впервые за последние годы на лазерной конференции появилась секция по лазерному бурению и разрушению горных пород. В основном на ней были представлены работы японских исследователей, которые утверждали, что эта проблема чрезвычайно актуальна для Японии, где вследствие землетрясений большое число горных склонов находится в критическом состоянии, создавая угрозу жизни населения.

Применение лазеров для сверления шурфов под взрывчатку и для разрушения горных пород чрезвычайно актуально, поскольку традиционные методы разрушения пород, сопровождающиеся механическими ударами и вибрациями, могут вызвать разрушение горного склона. Д.Сугимото и др. (Университет Токай, Япония) использовали непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 13 кВт для сверления туфа и гранита.

При лазерном сверлении гранита скорость проходки снижалась с 1.8 до 0.7 мм/с при увеличении глубины шурфа с 3 до 12 см. Оценка средней скорости проходки шурфа длиной ~8 м при бурении излучением CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 50 кВт дала 2.76 мм/с для туфа и 1.23 мм/с для гранита. Скорость лазерной проходки туфа в 2 раза выше, чем скорость проходки при механическом сверлении. Авторы предлагают создать передвижной 50-киловаттный кислородно-иодный лазер для применения в горном деле.

Эксперименты по лазерной резке песчаника и гранита излучением CO<sub>2</sub>-лазеров мощностью до 10 кВт были выполнены в работе К.Нагаи (корпорация Тайсей, Япония). Скорость резки достигала 3 м/мин при толщине реза 10 мм. Максимальная толщина реза составляла 63 мм при мощности излучения 10 кВт (скорость резки ~100 мм/мин). Показано также преимущество комбинированного метода сверления гранита: за воздействием лазерного излучения, которое вызывает растрескивание породы и делает ее более хрупкой, следует механическое сверление (диаметр сверла до 2 см). Двухлучевая YAG-лазерная система с суммарной мощностью излучения 6 кВт использовалась в натуральных экспериментах в горных условиях (М.Сато, Геофизическая исследовательская лаборатория, Япония). В течение 7 мин лазерное излучение просверливало отверстие диаметром 2 см в слое породы толщиной 20 см.

### Демонтаж ядерных реакторов и очистка от радиоактивных загрязнений

В докладе С.Сайшу (Корпорация по технике атомных станций, Япония) сообщалось о модельных опытах по

резке внутренних частей ядерного реактора (при его демонтаже) толщиной ~10–30 см излучением CO-лазера мощностью 20 кВт. YAG-лазеры также рассматривались как потенциальные источники мощного излучения при демонтаже ядерных реакторов. Для очистки зараженных поверхностей от поверхностных радиоактивных загрязнений применялся Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности ( $\tau = 12$  нс). В результате абляции поверхностного слоя под лазерным излучением радиоактивность поверхности, загрязненной <sup>60</sup>Со, снижалась с 359 до 0.22 Бк/г. О дистанционной резке технологических элементов ядерного реактора, извлеченных из его активной зоны, излучением 5-киловаттного CO<sub>2</sub>-лазера сообщалось в докладе В.Я.Панченко и др. (НИИЦТЛ, Шатура).

Подводная лазерная резка проводилась излучением кислородно-иодного лазера мощностью до 7 кВт (Х.Окадо и др., Предприятие тяжелого машиностроения «Кавасаки», Япония). Излучение транспортировалось к объекту при помощи световода. Для создания газозаполненного промежутка размером ~10 мм между выходом световода и обрабатываемой поверхностью последняя обдувалась кислородом, исходящим из сверхзвукового сопла.

Х.Танака (Токийский университет, Япония) сообщил, что при использовании кислородно-иодного лазера с мощностью излучения 30 кВт для резки бетона толщиной 1 м скорость резки составляет 13 мм/мин. Эти данные полезны для разработки концептуальной модели передвижного кислородно-иодного лазера, предназначенного для лазерного демонтажа ядерных реакторов. В США также рассматривается возможность использования кислородно-иодного лазера для лазерного демонтажа ядерных реакторов (У.Соломон и др., Иллинойский университет, Урбана).

### Мощные твердотельные лазеры

Основное внимание на конференции было уделено мощным лазерным диодам и диодным линейкам, волоконным лазерам, лазерам с диодной накачкой. Информация о последних приведена в разд. «Пленарное заседание». С.Накамура (Химические заводы Нишиа, Япония) сообщил о достижении мощности генерации ~420 мВт в квантоворазмерном InGa<sub>N</sub>-лазерном диоде (мощность 100 мВт при генерации на основной поперечной моде).

В Германии создана непрерывная 2-киловаттная система на основе лазерных диодов, излучение которой подводится к обрабатываемому образцу оптическим волокном при интенсивности излучения на образце ~200 кВт/см<sup>2</sup> (Ф.Дорш и др., Йеноптик – лазерные диоды, ФРГ).

В докладе В.Рейхеля (Институт физики высоких технологий, Йена, ФРГ) сообщалось о создании очень компактного (длиной менее 10 м) волоконного лазера (кварц с присадкой Yb) с мощностью генерации 5 Вт и КПД 65%. КПД диодной накачки стержневого Nd:YAG-лазера с мощностью генерации ~1 кВт доведен до 46% при электрооптическом КПД 52% (А.Такада, Объединенный промышленно-инженерный центр корпорации Тошиба, Япония). При использовании многоэлементной лазерной конфигурации достигнута мощность излучения 3.3 кВт.

### Мощные газовые лазеры

Японские исследователи известны своими разработками мощных лазеров на окиси углерода. В работе К.

Шимицу (Институт исследований и инноваций, Япония) был создан компактный СО-лазер с ВЧ накачкой с мощностью генерации до  $\sim 1$  кВт. Лазер действует при комнатной температуре и скоростной аксиальной прокачке лазерной смеси ( $\sim 200$  м/с). Длина и диаметр лазерной трубки составляют 300 и 30 мм. Увеличение частоты модуляции накачки с 13.56 до 27.12 МГц приводило к увеличению мощности на 10–20 %. При использовании лазерной смеси  $\text{CO} - \text{N}_2 - \text{He} - \text{O}_2$  мощность генерации и КПД лазера достигали 830 Вт и 12.2 %. Добавление в лазерную смесь более дешевого газа Кг оказалось более эффективным для достижения максимальной мощности, чем добавление Хе (полученные мощность и КПД составили 910 Вт и 14.8 % с Кг, 810 Вт и 16.2 % с Хе). Для достижения стабильной и мощной генерации чрезвычайно важно снизить концентрацию  $\text{H}_2\text{O}$  в лазерной смеси до менее 260 ppm.

Среди эксимерных лазеров в основном были представлены импульсно-периодические электроразрядные ХеСI-лазеры с рентгеновской предионизацией и средней мощностью излучения до 1 кВт, исследованные в Нидерландском центре лазерных исследований, в Марсельском университете и фирме СОПРА (Франция) и в Исследовательском центре Фраскати (Италия). После того как несколько лет назад для лазеров этого типа была продемонстрирована киловаттная средняя мощность, основными задачами исследований стали достижение высокого качества лазерного пучка, управление длительностью и соответственно пиковой мощностью импульсов.

Сочетание однородной ионизации газа в разрядном промежутке с усовершенствованной схемой питания разряда и применение неустойчивого резонатора позволило голландским ученым увеличить длительность генерируемых импульсов и достигнуть близкой к дифракционной расходимости излучения. При таких параметрах излучения лазер способен был делать отверстия диаметром от 10 до 100 мкм в различных материалах – металлах (алюминий, сталь, титан, никель), пластиках, керамике, композитах – со средней производительностью до 1000 отв./с.

Высокая направленность пучка была продемонстрирована авторами из исследовательского центра Фраскати и в экспериментах на ХеСI-лазере с двумя разрядными камерами, где в схеме генератор – усилитель мощности расходимость излучения сохранялась вблизи дифракционного предела при увеличении частоты повторения импульсов до 50 Гц.

Оптическая схема генератор – регенеративный усилитель применялась также в экспериментах французских ученых для получения импульсов относительно малой длительности (1–3 нс) с энергией порядка 1 Дж, обеспечивающих пиковую интенсивность  $10^{11} - 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> при фокусировке излучения на мишени. Область возможного применения такого лазера – разработка эффективного источника мягкого рентгеновского излучения на основе лазерной плазмы для рентгеновской микроскопии, микролитографии, радиобиологии и т. д.

Мощные высокоэнергетичные КгF-лазеры с накачкой электронным пучком были представлены на конференции лишь работами японских ученых из Электротехнической лаборатории. В первой из них, посвященной разработке системы сжатия лазерных импульсов для КгF-установки ASHURA на основе ВКР, использовалось прямое усиление стока сигнала на длине волны 268 нм, полученного в ячейке со смесью метана и водорода, в

ВКР-предусилителе и 5-проходовом усилителе. Эффективность преобразования энергии накачки в усилителе составила 73 % при уменьшении длительности импульсов с 25 до 5 нс.

Во второй работе сообщалось о создании высоковольтной системы питания электронных ускорителей (300 кВ, 80 нс) на основе формирующих линий с водяной изоляцией и магнитными коммутаторами для разрабатываемого в лаборатории импульсно-периодического КгF-лазера. Рассмотрена также конструкция охлаждаемого вакуумно-плотного окна для вывода электронного пучка в лазерную камеру, в которой вместо обычно применяемой титановой фольги предполагается использовать фольгу из сплава HAVAR, обладающего высокой прочностью, хорошей теплопроводностью и устойчивостью к фтору.

## Рентгеновские лазеры

Это направление было представлено на конференции американскими, французскими, японскими и китайскими исследованиями. Наряду с поисками новых активных сред со столкновительным механизмом возбуждения для генерации мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров проводилась оптимизация уже существующих Ne- и Ni-подобных схем в лазерной плазме с целью увеличения мощности генерации, улучшения временной и пространственной когерентности излучения. Большое внимание уделялось также применениям этих лазеров и тому, чтобы сделать их привычным инструментом для всевозможных исследований в других областях физики.

В докладе группы французских ученых (Национальный научно-исследовательский центр университета Пари-Сюд) сообщалось о получении генерации на переходах Ne-подобного железа и цинка с длинами волн соответственно 25.5 и 21.1 нм, а также на переходах Ni-подобного серебра с  $\lambda = 13.9$  нм в лазерной плазме, создаваемой на мощном многопучковом Nd-лазере LULI с помощью нескольких лазерных импульсов с длительностями от 100 до 600 пс и энергией до нескольких сотен джоулей. Использовались фокусировка пучков в линию длиной до 2 см и отражающие рентгеновские зеркала на основе многослойных Mo/Si-структур.

В совместных экспериментах японских, китайских и французских авторов на Nd-лазерной установке GEKKO XII плазма также создавалась с помощью нескольких мощных лазерных импульсов, которые фокусировались с двух противоположных сторон на двух плоских мишенях, выставленных с большой точностью по отношению друг к другу. В такой схеме, отличающейся меньшей рефракцией рентгеновского излучения, удалось получить генерацию в режиме бегущей волны на ряде переходов Ni-подобных ионов различных элементов с длинами волн от 13.9 (серебро) до 4.6 нм (гафний). Кроме того, в тантале и вольфраме обнаружена генерация на более коротковолновых переходах (с длинами волн 4.5 и 4.3 нм). Целью этих исследований является получение интенсивного лазерного рентгеновского излучения в так называемом «окне прозрачности воды» для различных биологических применений.

В то время как две предыдущие работы были выполнены на очень крупных лазерных установках, ученые из



Исследовательского центра прогрессивных фотонных технологий, Кансай, и Исследовательского центра атомной энергии (Япония) рассказали о создании настольного рентгеновского лазера.

Для его накачки использовалась лазерная система, состоящая из Ti:сапфирового генератора коротких импульсов и усилителей на Nd-стекле. Система генерировала в двух пучках предимпульсы с длительностью 1 нс и энергией 10 Дж и короткие импульсы с длительностью 1 пс и энергией 15 Дж. Интенсивность излучения достигала  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> при фокусировке в линию длиной 2 см. В этих условиях исследовалась нестационарная генерация на переходах Ne-подобного титана ( $\lambda = 32.6$  нм) и Ni-подобного серебра ( $\lambda = 13.9$  нм).

Особый интерес участников секции рентгеновских лазеров вызвала работа ученых Колорадского университета (США), где несколько лет назад был запущен первый рентгеновский лазер, возбуждаемый не в лазерной плазме, а в микрокапиллярном разряде. Лазер работает на Ne-подобном аргоне с  $\lambda = 46.9$  нм, т. е. в спектральной области, в которой уже разработаны отражающие рентгеновские зеркала и другая оптика. Выходная энергия лазера достигает 1 мДж при частоте повторения импульсов 4 Гц.

Относительная простота и небольшие размеры делают этот лазер по-настоящему лабораторным инструментом. В докладе продемонстрированы возможности его применения для теневого фотографирования плотной плазмы капиллярного разряда и интерферометрии лазерной плазмы. В обоих случаях малая длина волны излучения позволяет зондировать области плазмы с высокой плотностью электронов, недоступные для традиционных оптических методов.

Более подробную информацию о форуме заинтересованный читатель может получить в трудах Международного общества оптической техники *Proc.SPIE* (т. 3885–3889).

## Лазеры на свободных электронах

Такой лазер, генерирующий импульсы излучения длительностью  $\sim 0.7$  пс с частотой  $\sim 75$  МГц в диапазоне длин волн 2–8 мкм при киловаттной мощности разработан в Национальном ускорительном центре им. Т. Джефферсона, США (доклад Г.Р.Мейла и др.). Предполагается довести мощность генерации до более чем 10 кВт в ближнем ИК диапазоне и до киловаттного уровня в диапазоне 0.3–60 мкм. В Исследовательском институте атомной энергии (Япония) лазер на свободных электронах действует в квазинепрерывном режиме с мощностью  $\sim 0.1$  кВт и выше (Э.Дж. Минехара). Планируется увеличить мощность генерации до 1 кВт. Обсуждается концепция создания промышленного лазера на свободных электронах мощностью 20 кВт, генерирующего на длине волны 1.5 мкм.

Yu.V.Afanasyev, I.N.Zavestovskaya, V.D.Zvorykin, A.A. Ionin, Yu.V. Senatskii, A.N.Starodub. *International forum on advanced high-power lasers and applications AHPLA'99*.

A review of reports made on the International forum on Advanced High-Power Lasers and Applications, which took place in November 1999 in Osaka (Japan) is presented. The forum consisted of five conferences: High-Power Laser Ablation, High-Power Lasers in Energy Engineering, High-Power Lasers in Civil Engineering and Architecture, High-Power Lasers in Manufacturing, and Advanced High-Power Lasers. The following lines of investigations in the field of high-power lasers and their applications were presented: laser fusion, laser applications in space, laser-triggered lightning, laser ablation of materials by short and ultrashort pulses, application of high-power lasers in manufacturing, application of high-power lasers in mining, laser decommissioning and decontamination of nuclear facilities, high-power solid-state and gas lasers, x-ray and free-electron lasers. One can find complete information on the forum in *Proc.SPIE*, vols. 3885–3889.